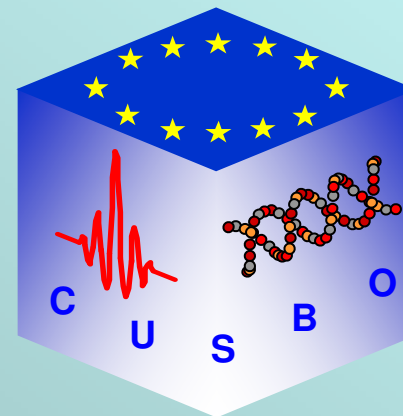


Fotografare la materia al femtosecondo: la danza delle molecole

Giulio Cerullo- Politecnico di Milano

→ *Dipartimento di Fisica*

→ *Istituto di Fotonica e Nanotecnologie (IFN-CNR)*



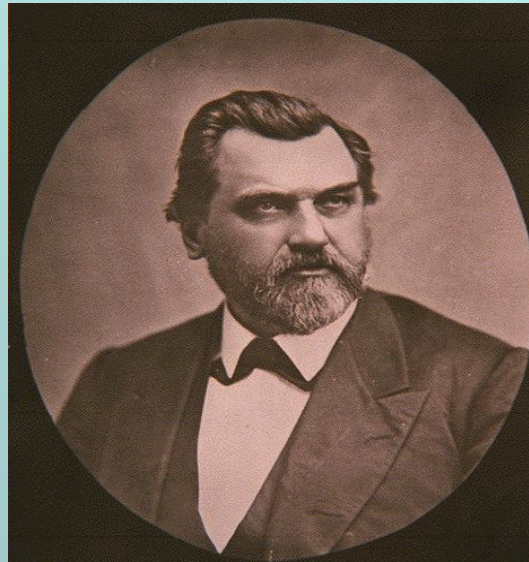
SCIENZA DEI FENOMENI ULTRABREVI

- ❑ I processi naturali sono spesso innescati da “eventi primari”:
 - gli “eventi primari” si sviluppano molto rapidamente nel tempo
 - è un modo per la Natura di garantirsi la massima efficienza nel perseguire una determinata azione
- ❑ Molti processi in natura coinvolgono la luce nei loro “eventi primari”
 - per poterli “catturare/inseguire nel tempo” servono impulsi di luce ultrabrevi: femto- (10^{-15}) e atto- (10^{-18}) secondi
 - il LASER è l'unico strumento in grado di generare tali impulsi

Utilizzo di flash luminosi per
filmare processi dinamici

Leland Stanford, fondatore della “Central Pacific Railroad”, perse il figlio per tifo.

In memoria del figlio decise di fondare nel 1891 la “Leland Stanford Junior University” su di un terreno nel quale avrebbe in realtà voluto costruire un ippodromo.

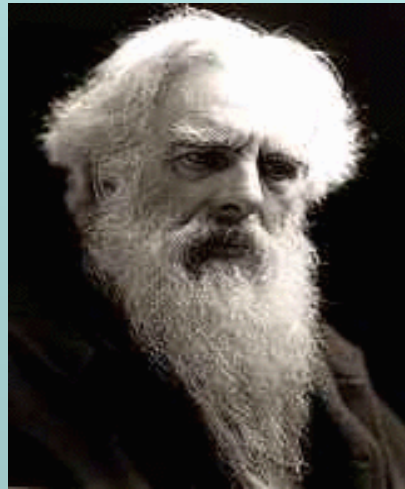


Leland Stanford

Il suo amore per i cavalli è testimoniato dal fatto che nel 1872 fece una scommessa con un amico:

C'è un istante nel quale un cavallo al galoppo tiene tutti e quattro gli zoccoli sollevati dal terreno?

Stanford commissionò (*si dice per 25.000 \$*) ad un noto fotografo inglese Eadweard Muybridge di trovare la risposta.



Eadweard Muybridge

Era convinzione comune che un cavallo sollevasse da terra tutti e quattro gli zoccoli nella fase di massima estensione, come in questo dipinto:



Le derby d'Epsom, di Theodore Gericault, 1821

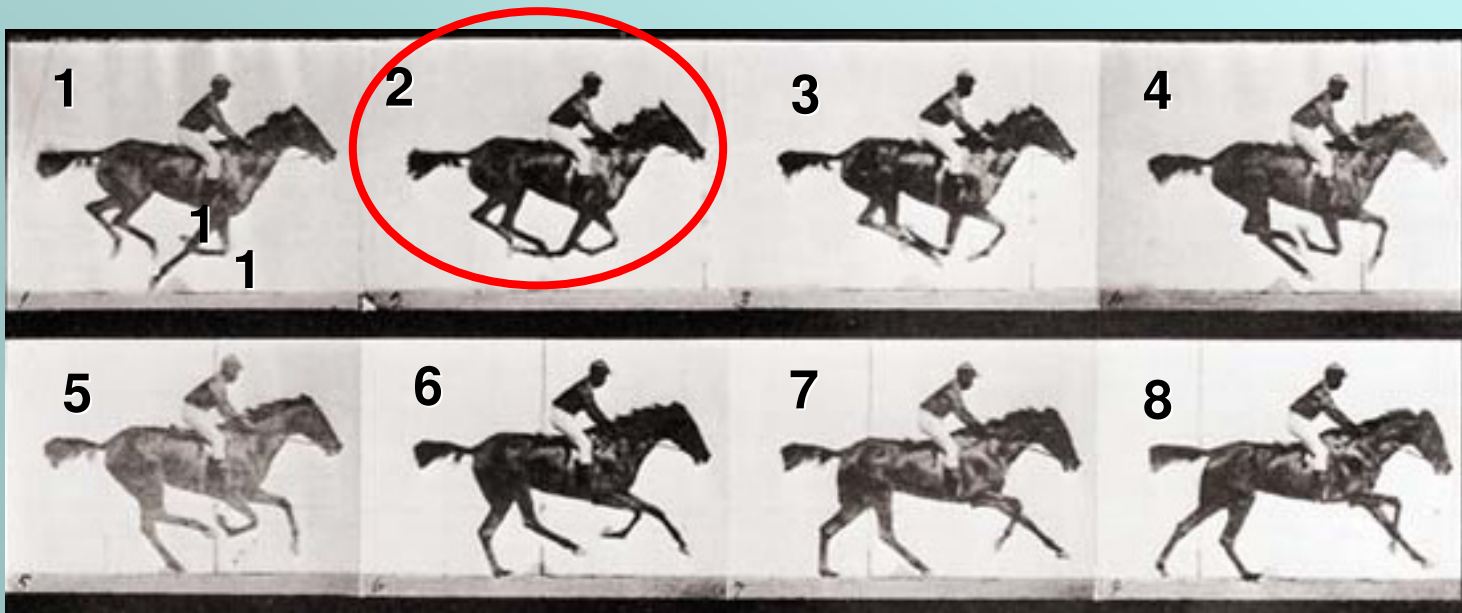
Muybridge cominciò col migliorare la velocità dell'otturatore delle macchine fotografiche di allora e la sensibilità delle pellicole.

Il suo lavoro fu interrotto nel 1874 perché imprigionato per l'omicidio del presunto amante della moglie.

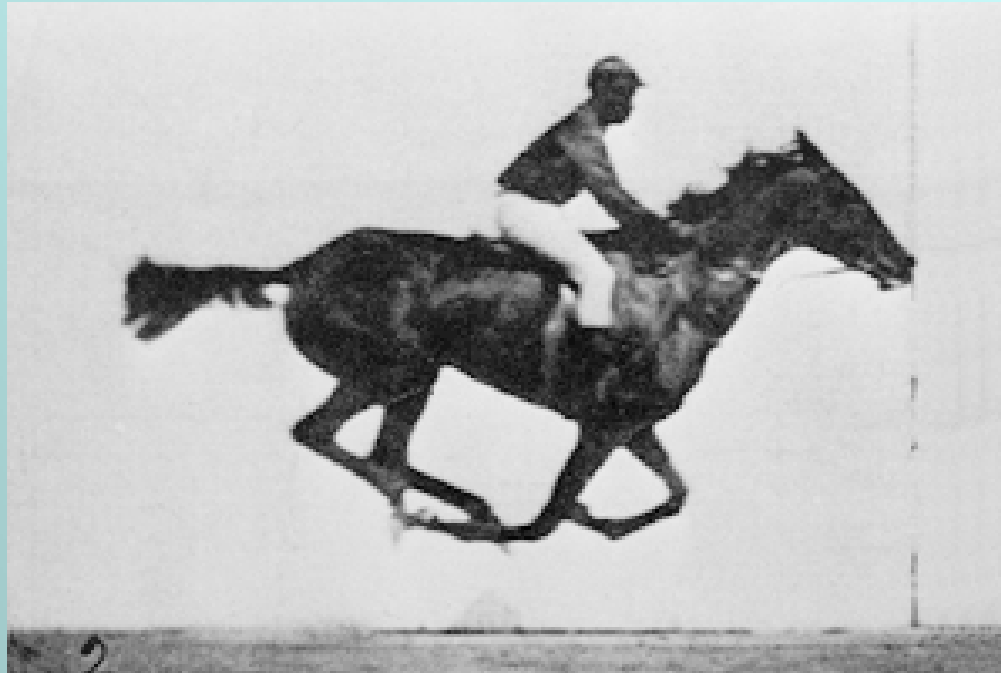
Grazie agli avvocati messi a disposizione da Stanford, egli fu assolto e riprese a lavorare sul problema.

Fotografia ad Alta Velocità: “congelare” il movimento

- ❑ Muybridge dispone 12 macchine fotografiche, separate da mezzo metro, lungo il percorso del cavallo
 - gli otturatori, azionati al passaggio del cavallo da fettucce stese sul percorso, espongono la pellicola per due **milli-secondi (0,002 secondi)**

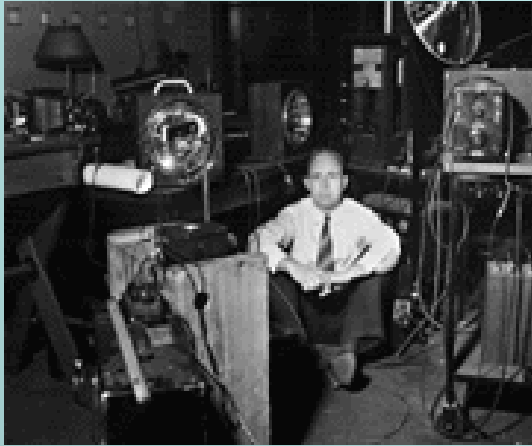


Fotografia ad Alta Velocità: “congelare” il movimento

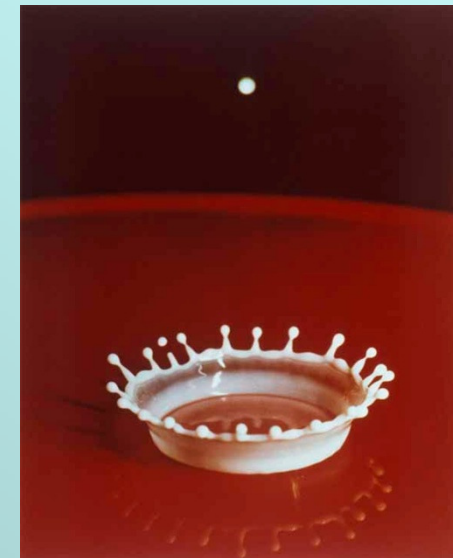
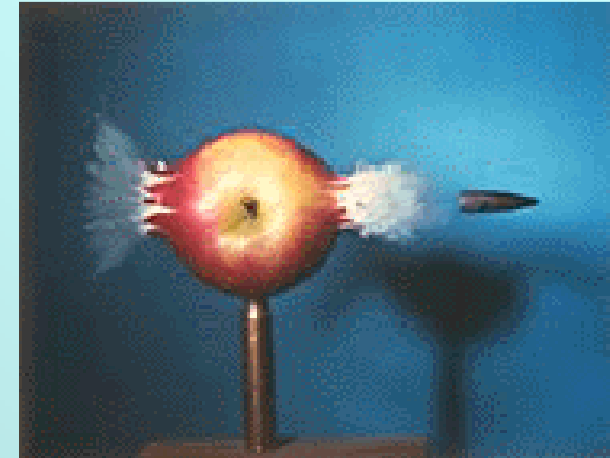


- ❑ Film del moto del cavallo ottenuto con le fotografie ad alta velocità di Muybridge

Fotografia stroboscopica



Harold
Edgerton
MIT, 1942



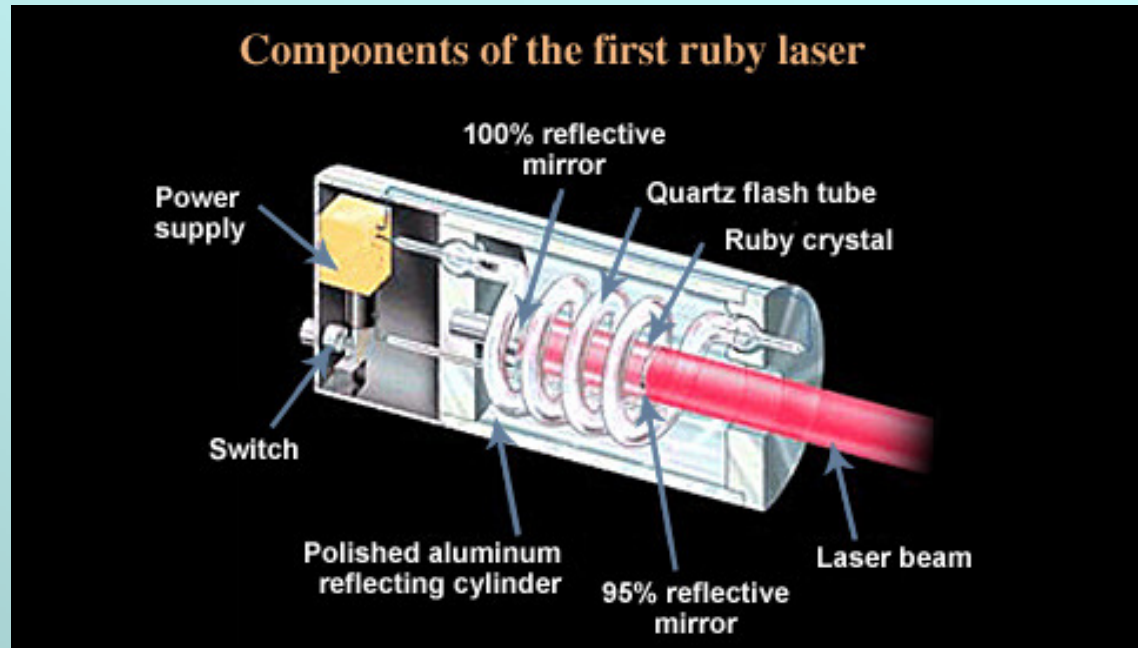
Risoluzione temporale: alcuni microsecondi. Come migliorarla?

Come filmare il moto delle molecole?

Le molecole sono estremamente piccole (dimensioni 10^{-9} m) e si muovono molto rapidamente (velocità 1000 m/s).

Per ottenere una immagine “a fuoco” di una molecola e filmarne, ad esempio, una reazione chimica, è necessario disporre di flash di luce di durata estremamente breve.

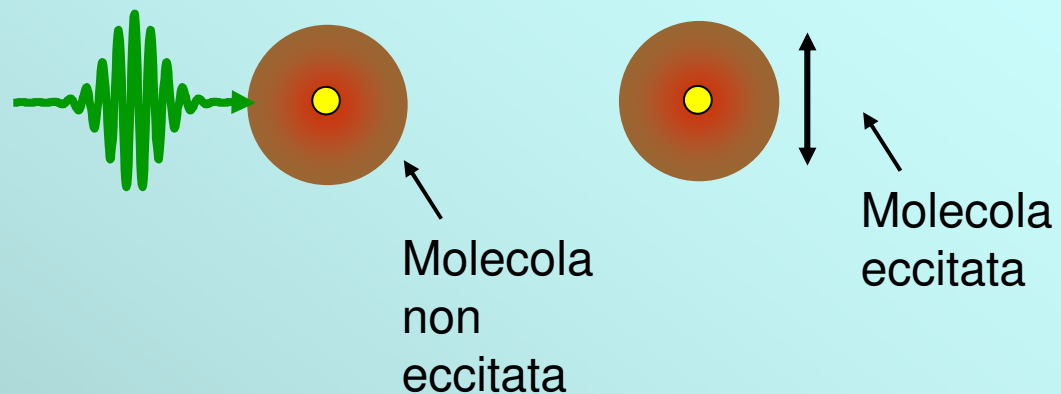
L'invenzione del laser



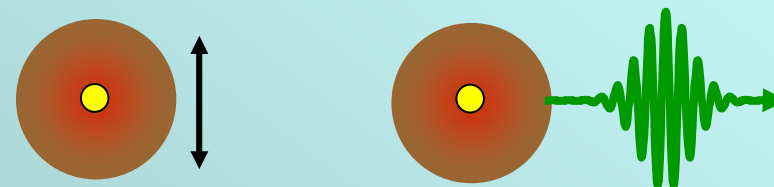
1960: Theodor Maiman, agli Hughes Research Laboratories, fa funzionare il primo laser a Rubino, ottenendo così luce coerente nel visibile. **Come funziona un laser?**

Processi fondamentali di interazione della luce con una molecola

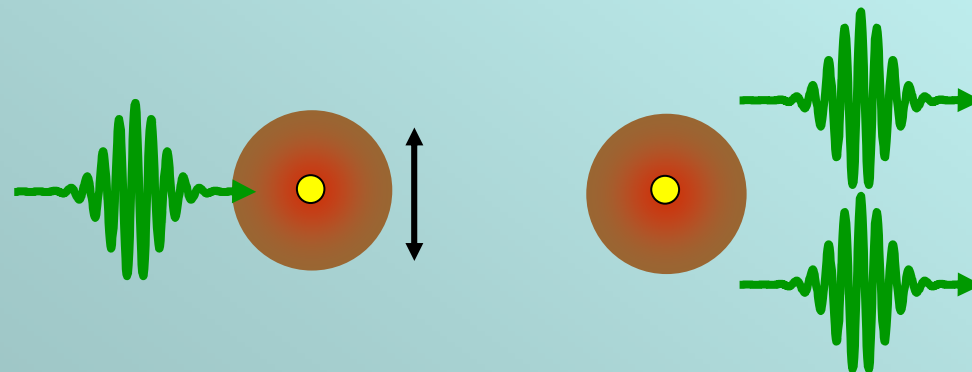
Assorbimento



Emissione spontanea



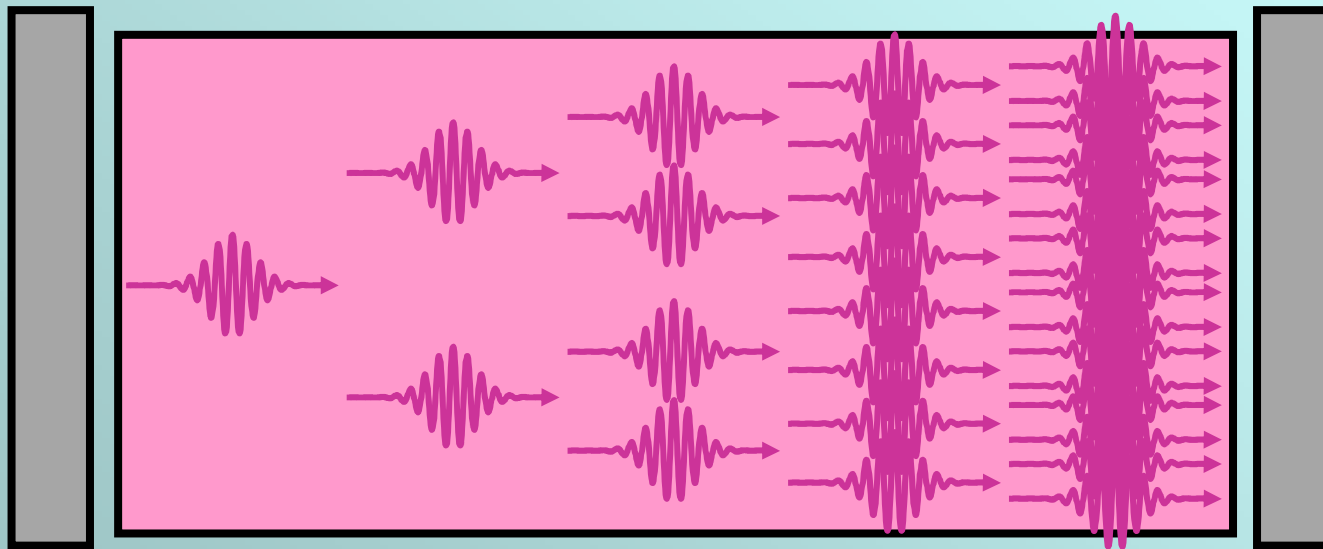
Emissione stimolata



L'essenza del laser

L'emissione stimolata dà luogo ad una reazione a catena e all'emissione di luce laser.

Materiale eccitato

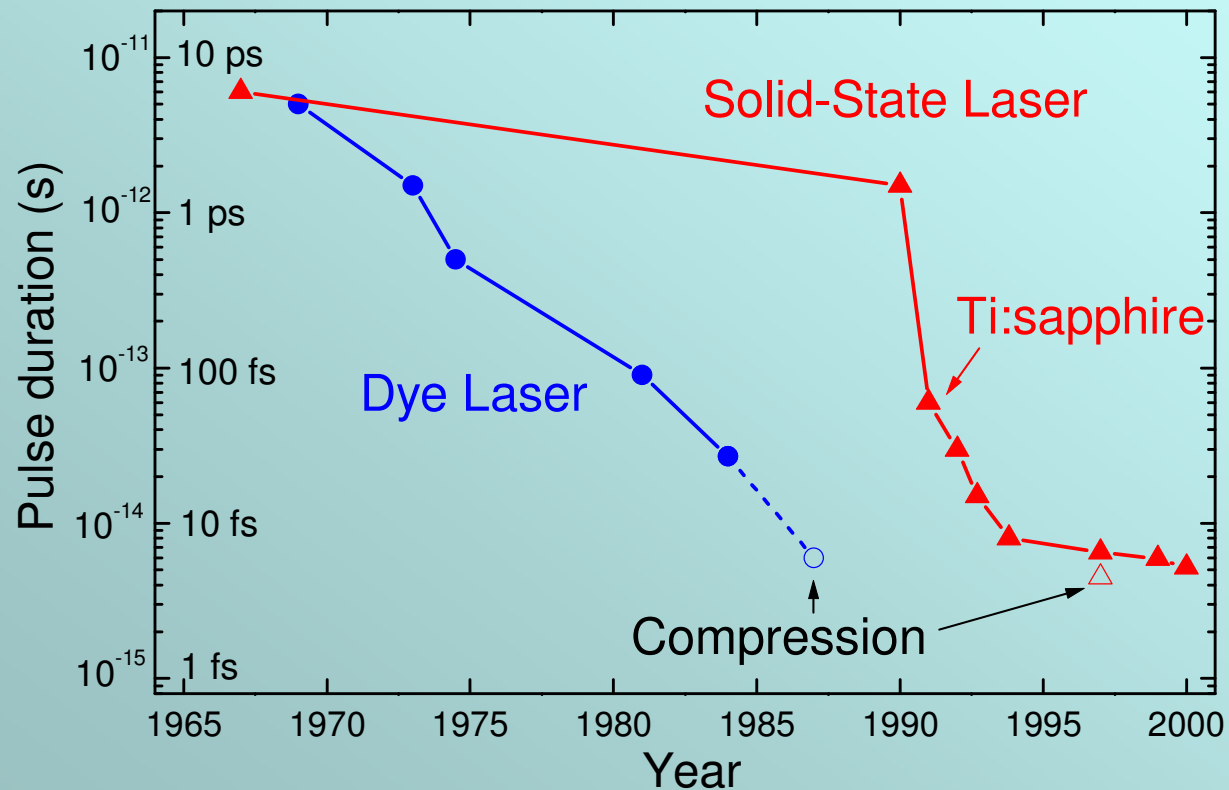


In un materiale con molte molecole eccitate, la luce viene amplificata mediante il processo dell'emissione stimolata.

Aggiungendo due specchi la luce rimbalza avanti e indietro e "risuona".

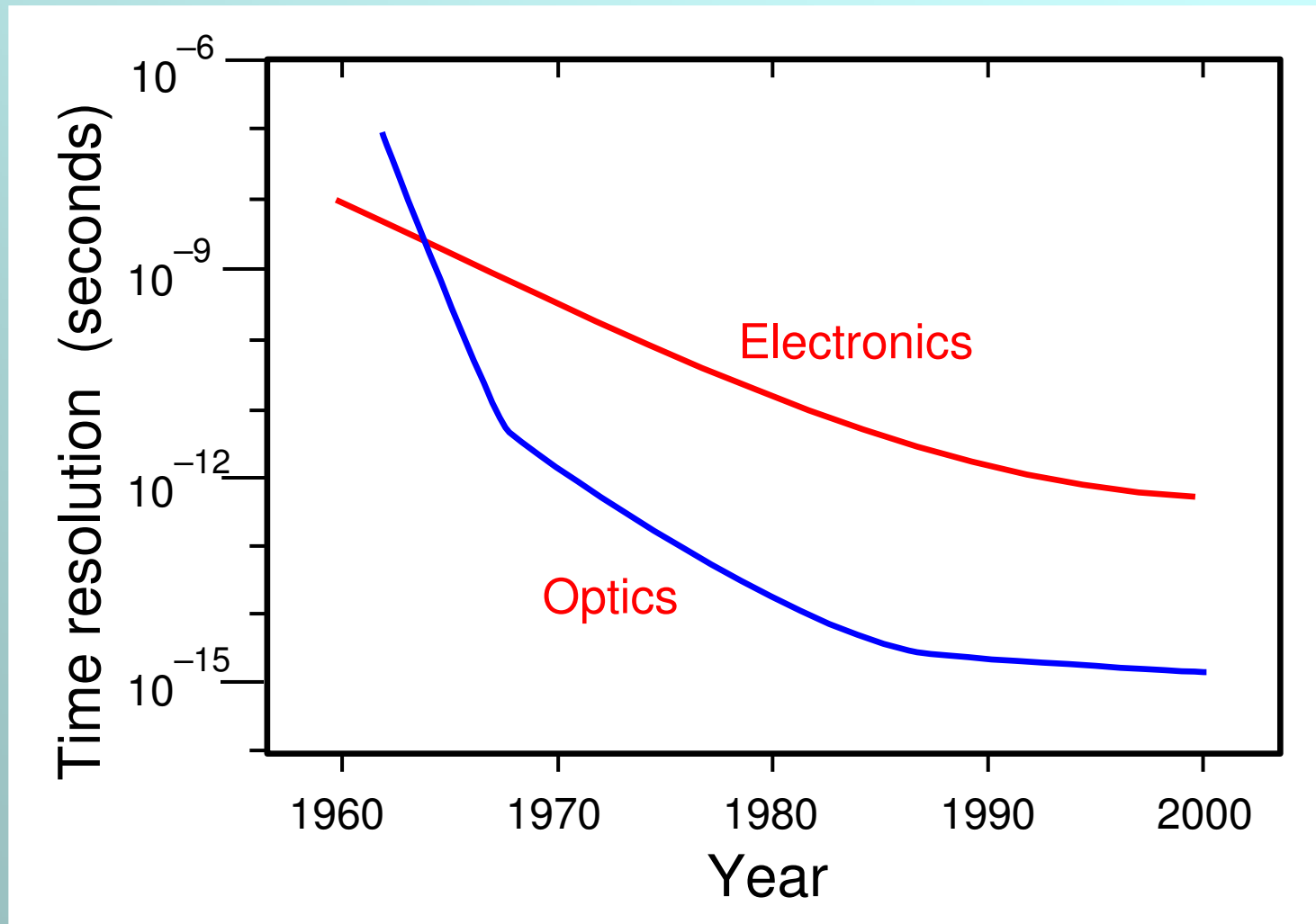
Dal laser alla generazione di impulsi di luce ultrabrevi

- Prima del laser: 10 ns (interruttore di Kerr)
- Dopo l'invenzione del laser: tecniche di mode-locking



- Attuale durata record nel visibile: 4 femtosecondi!

Generazione di impulsi brevi: confronto tra ottica ed elettronica



- L'ottica vince di quasi tre ordini di grandezza!

Gli estremi raggiunti con i laser

Gli impulsi generati dai laser sono incredibilmente brevi e le loro potenze di picco incredibilmente alte.

Impulsi brevi:

5 femtosecondi = 5×10^{-15} s nel visibile

100 attosecondi = 100×10^{-18} s nei raggi X

Potenze di picco elevate:

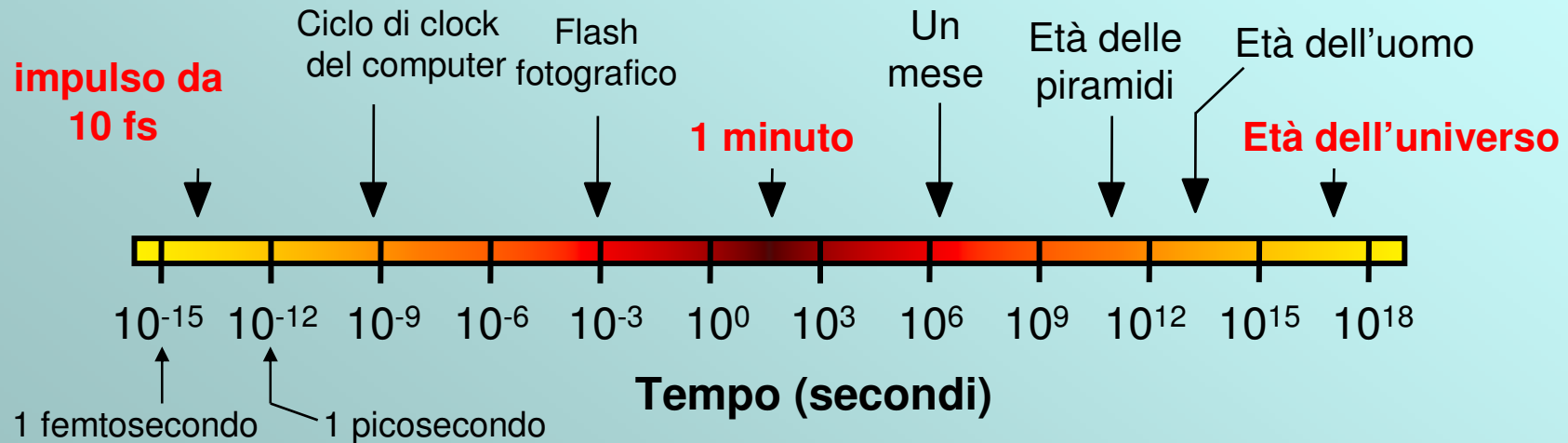
1 Terawatt = 10^{12} W (laboratori del Politecnico di Milano)

1 Petawatt = 10^{15} W (Lawrence Livermore Laboratories, laser per la fusione a confinamento inerziale)

1 Exawatt = 10^{18} W attualmente in costruzione in Europa!

Scale temporali

E' di routine generare impulsi di durata inferiore a 1 picosecondo.
Laboratori di ricerca (tra cui il Politecnico di Milano) generano impulsi della durata di 10 femtosecondi.



Un impulso da 10 fs sta ad un minuto come un minuto sta all'età dell'universo.

Quanto è breve un impulso a femtosecondi?

In un secondo un impulso di luce viaggia dalla terra alla luna.

**In 10 femtosecondi un impulso di luce viaggia per 3 micron,
pari alle dimensioni di un microbo!**

**Un impulso da 10 femtosecondi sta ad un secondo come una
moneta da 2 centesimi sta al debito pubblico italiano!**



2.000.000.000.000 €

Perchè un laser genera impulsi di luce così brevi?

La luce è un'onda elettromagnetica che oscilla nel tempo, con periodo:

$$T = \lambda / c$$

dove λ è la lunghezza d'onda e c la velocità della luce.

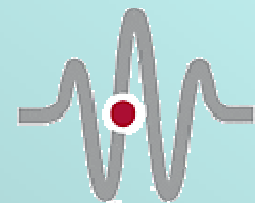
Per la luce visibile è: $\lambda = 0.6 \mu\text{m} = 0.6 \times 10^{-6} \text{ m}$.

Ricordando che $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ otteniamo:

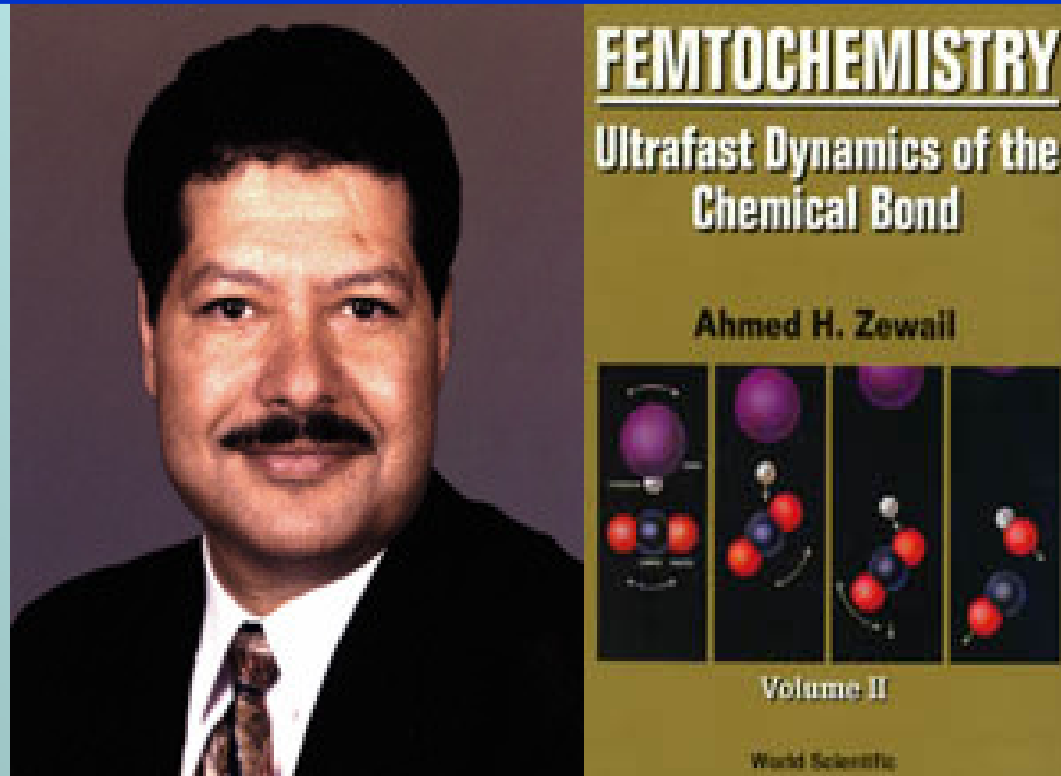
$$T = 2 \times 10^{-15} \text{ s} = 2 \text{ femtosecondi.}$$

La luce visibile oscilla con un periodo di 2 femtosecondi, ossia 500000 miliardi di volte in un secondo!

Un impulso a femtosecondi contiene solo pochi cicli di oscillazione del campo elettromagnetico!



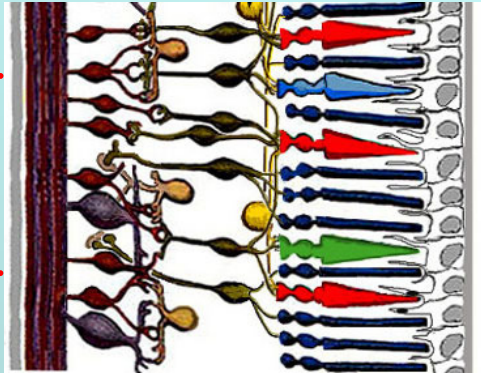
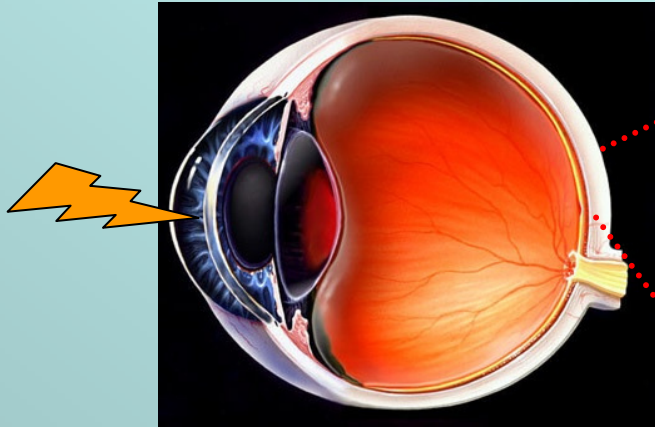
Premio Nobel per la chimica 1999: Prof. Ahmed Zewail



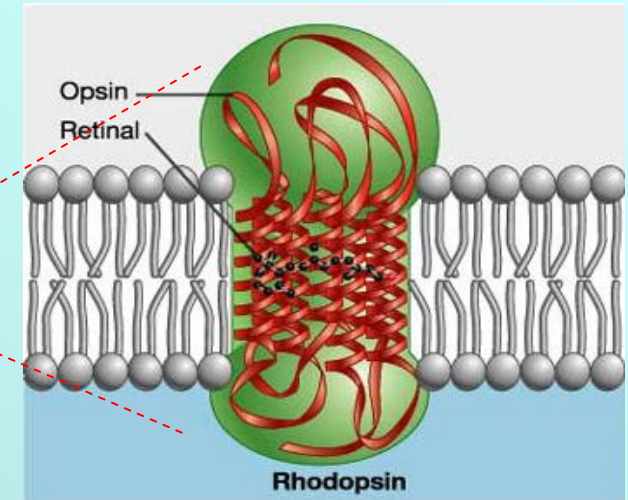
Zewail (unico premio Nobel musulmano nella scienza) ha utilizzato impulsi di luce ultrabrevi per visualizzare il moto delle molecole e studiare le reazioni chimiche.

Gli Eventi Primari
nei Processi di
Visione e Fotosintesi

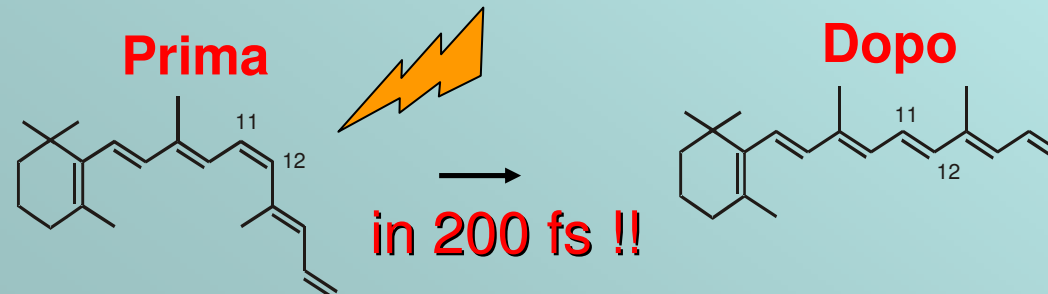
Evento Primario della Visione



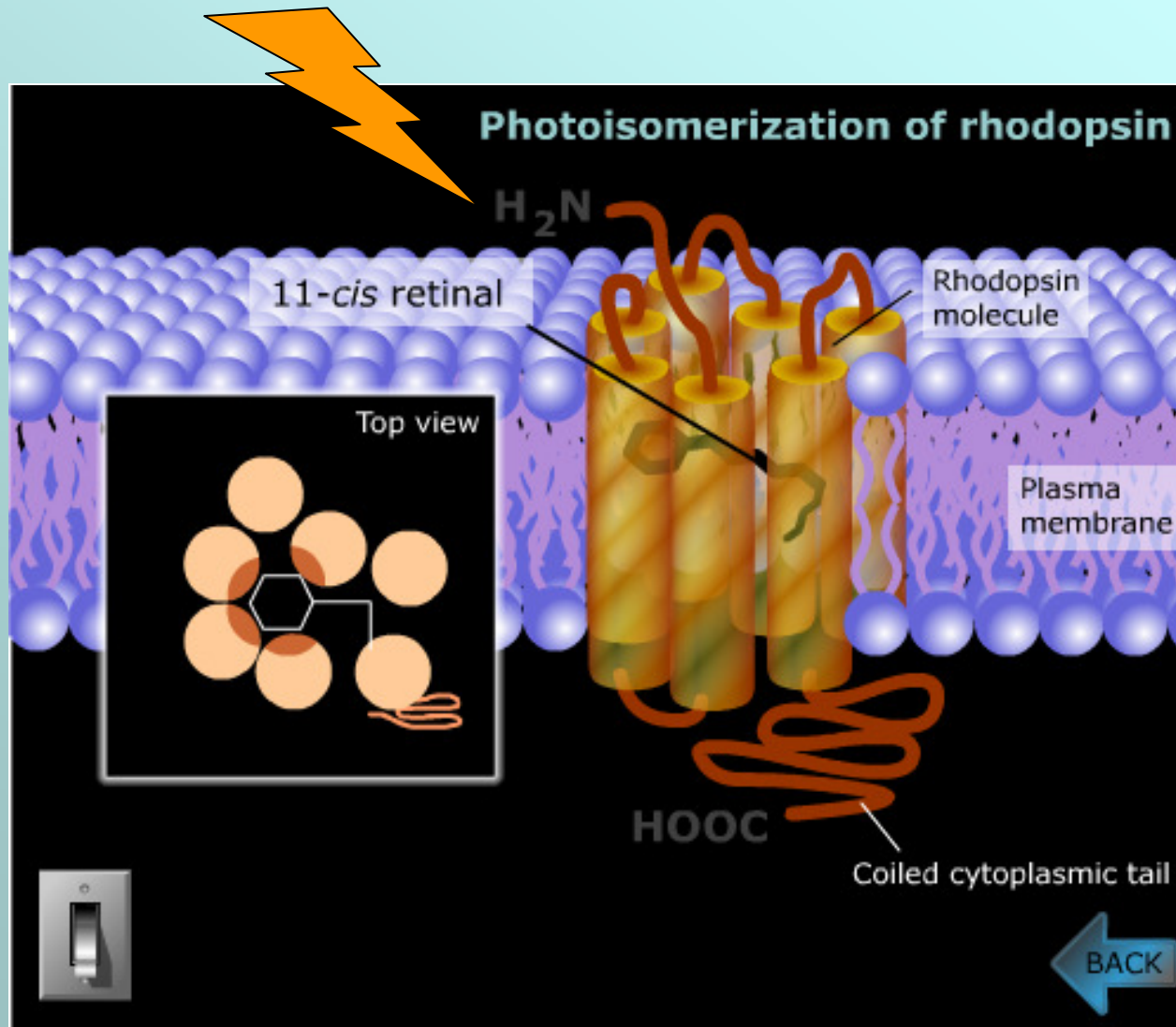
Bastoncelli e Coni



- La **Rodopsina** nei bastoncelli e la **Iodopsina** nei coni sono tasche proteiche che contengono il cromoforo (**retinale**)
- Evento primario della visione: “isomerizzazione” ultraveloce del retinale

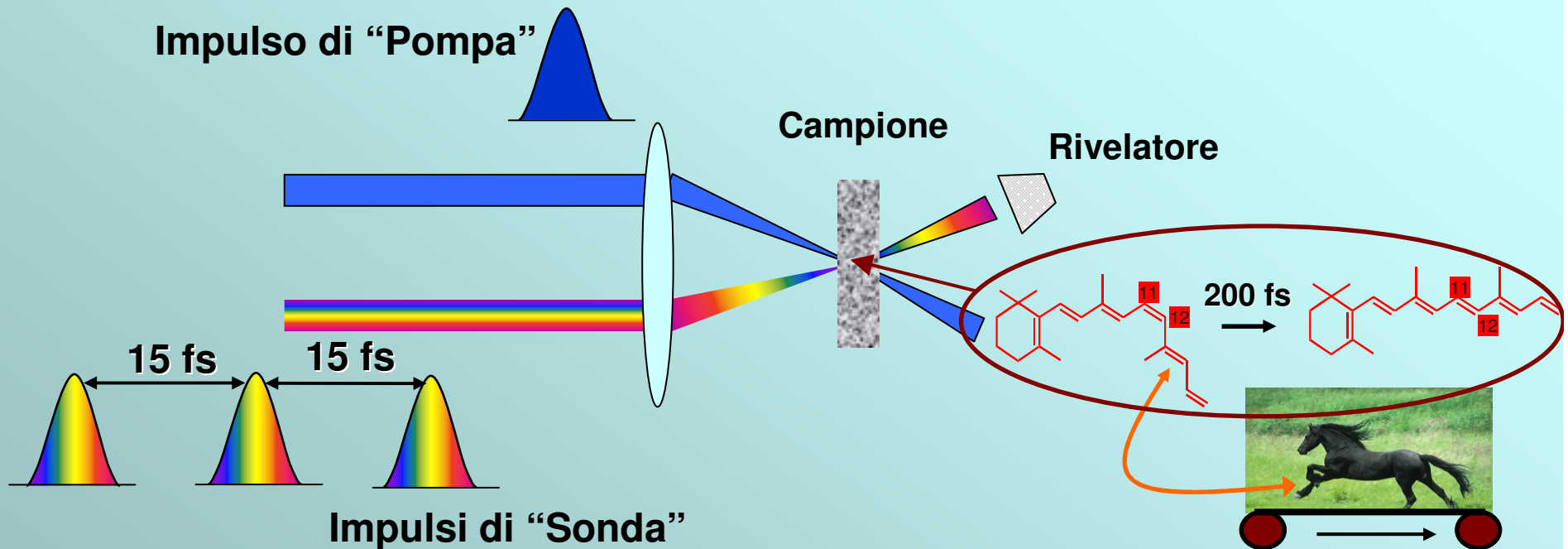


Il Movimento del Retinale in 3-D



Dal Cavallo alla Molecola

Un impulso di luce detto “Pompa” viene assorbito dalla molecola e inizia il processo: *si comanda al cavallo (su di un tapis roulant) di cominciare a muoversi*

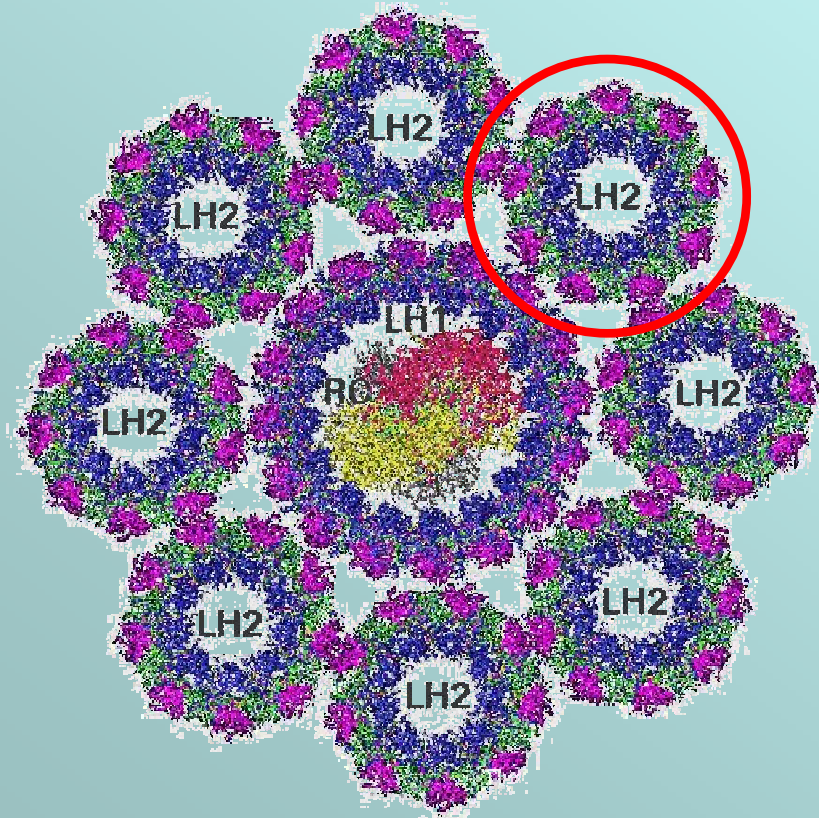


Impulsi di luce detti “Sonda” arrivano a diversi ritardi e fissano nel tempo l’evoluzione della molecola:

- Il colore della luce trasmessa dalla molecola dipende dalla sua forma
- La variazione del colore trasmesso a diversi ritardi dà **in modo indiretto informazioni sulla forma**: *scattare “fotografie” a diversi istanti per fissare il moto delle zampe del cavallo*

Fotosintesi: trasformazione della luce in energia chimica (nutrimento delle piante)

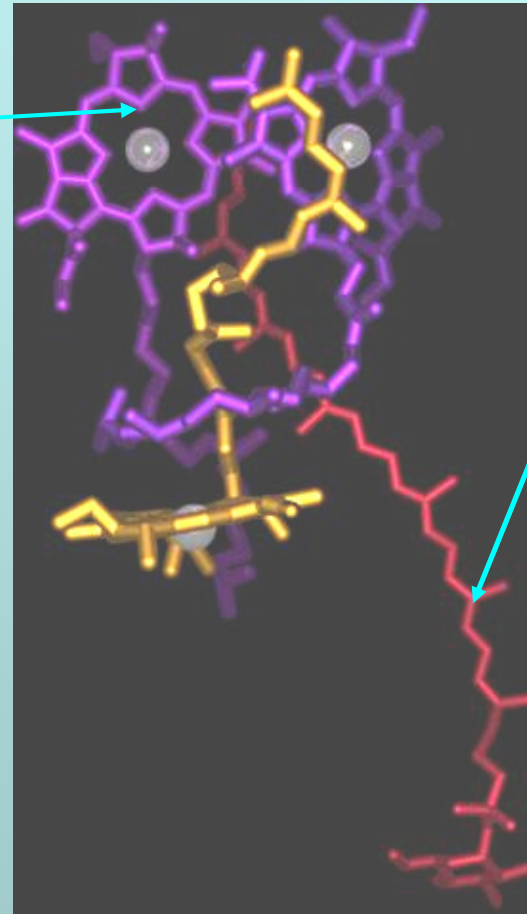
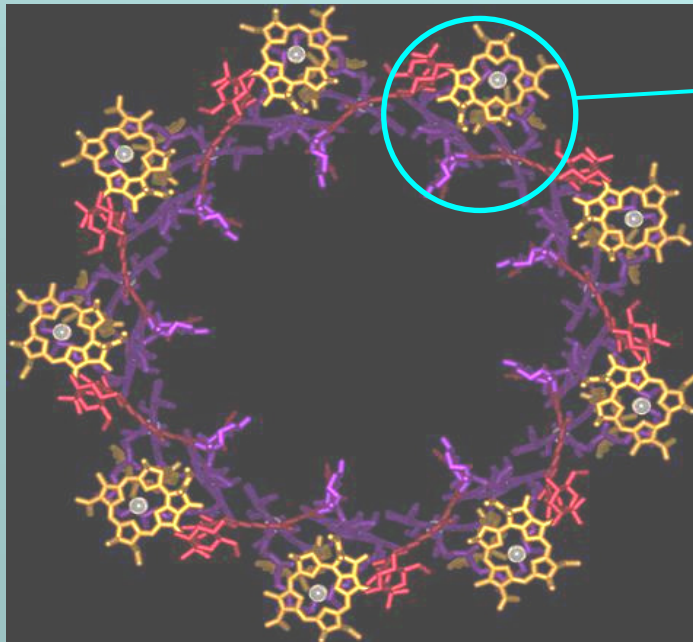
Unità fotosintetica presente nelle foglie, detta anche “complesso antenna”



I complessi (LH1 e LH2) **assorbono la luce** e trasferiscono l'energia al **centro di reazione (RC)** da cui parte la trasformazione in energia chimica

Complesso LH2

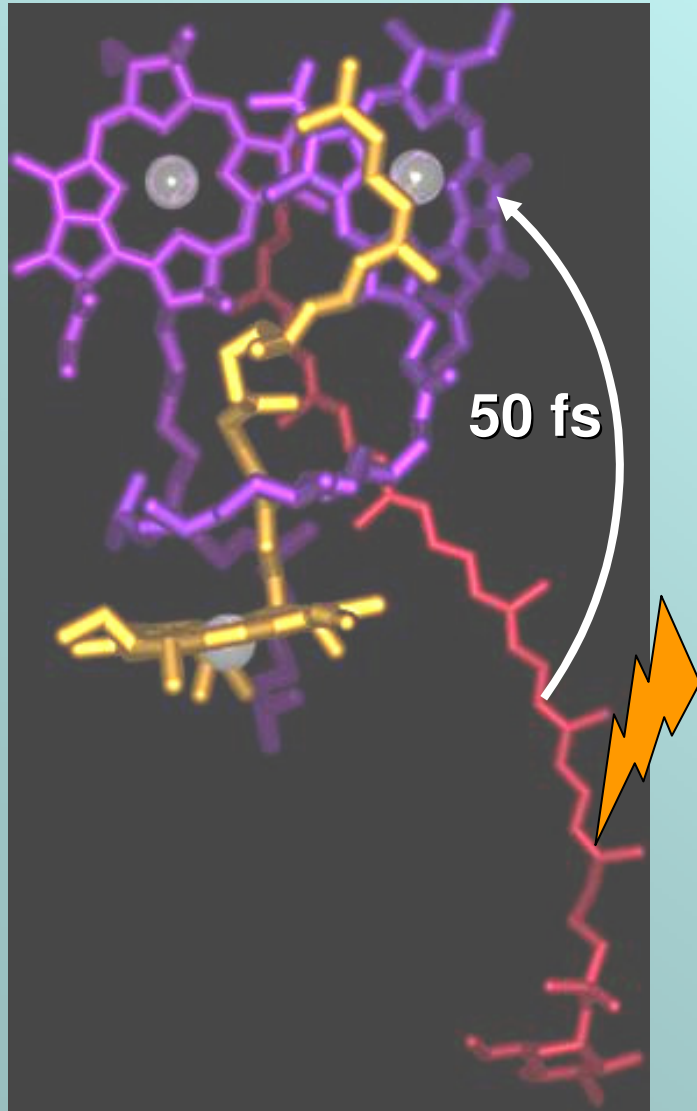
LH2 è fatto da 9 unità di clorofilla ciascuna contenente un carotenoide



Carotenoide



Carotenoide → Clorofilla

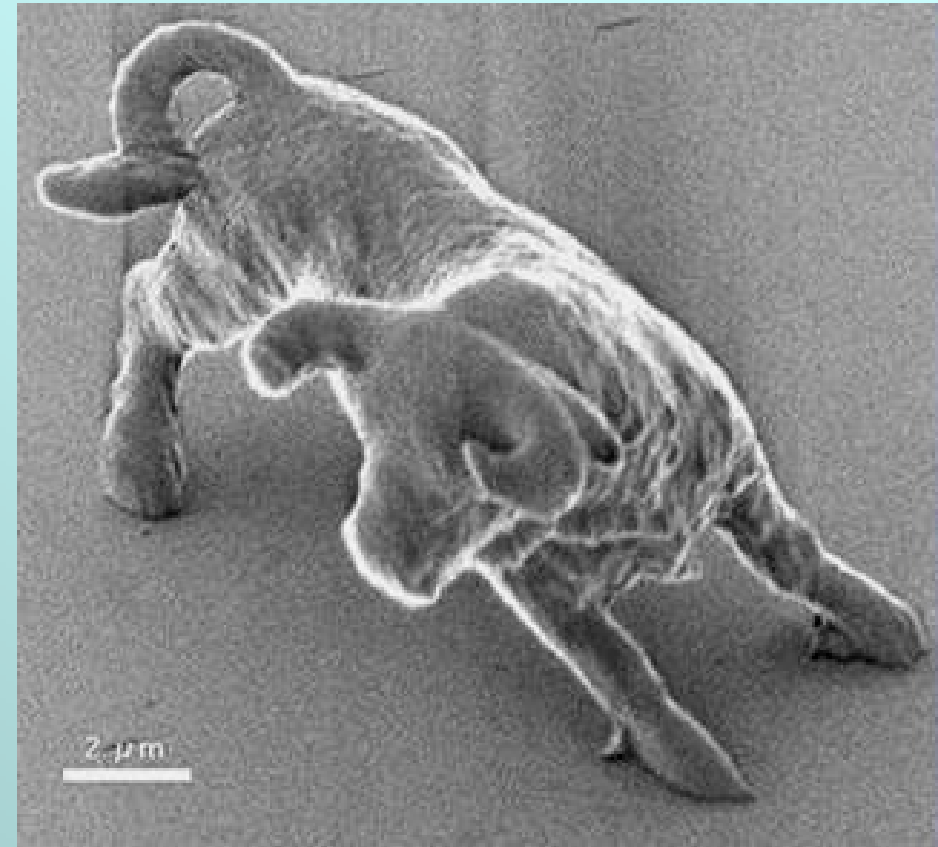
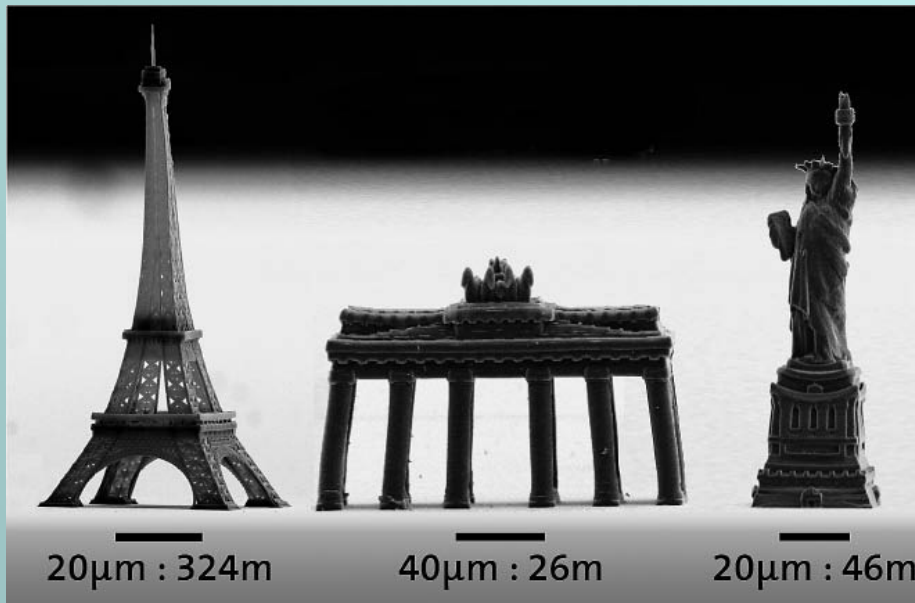


Il carotenoide assorbe la luce

- L'energia assorbita viene trasferita alla clorofilla
- Il trasferimento avviene in 50 femtosecondi: **evento primario della fotosintesi !!**
- La brevità dell'evento riduce drasticamente la competizione con processi dissipativi

Altre applicazioni degli impulsi a femtosecondi

Polimerizzazione a due fotoni: sculture micrometriche



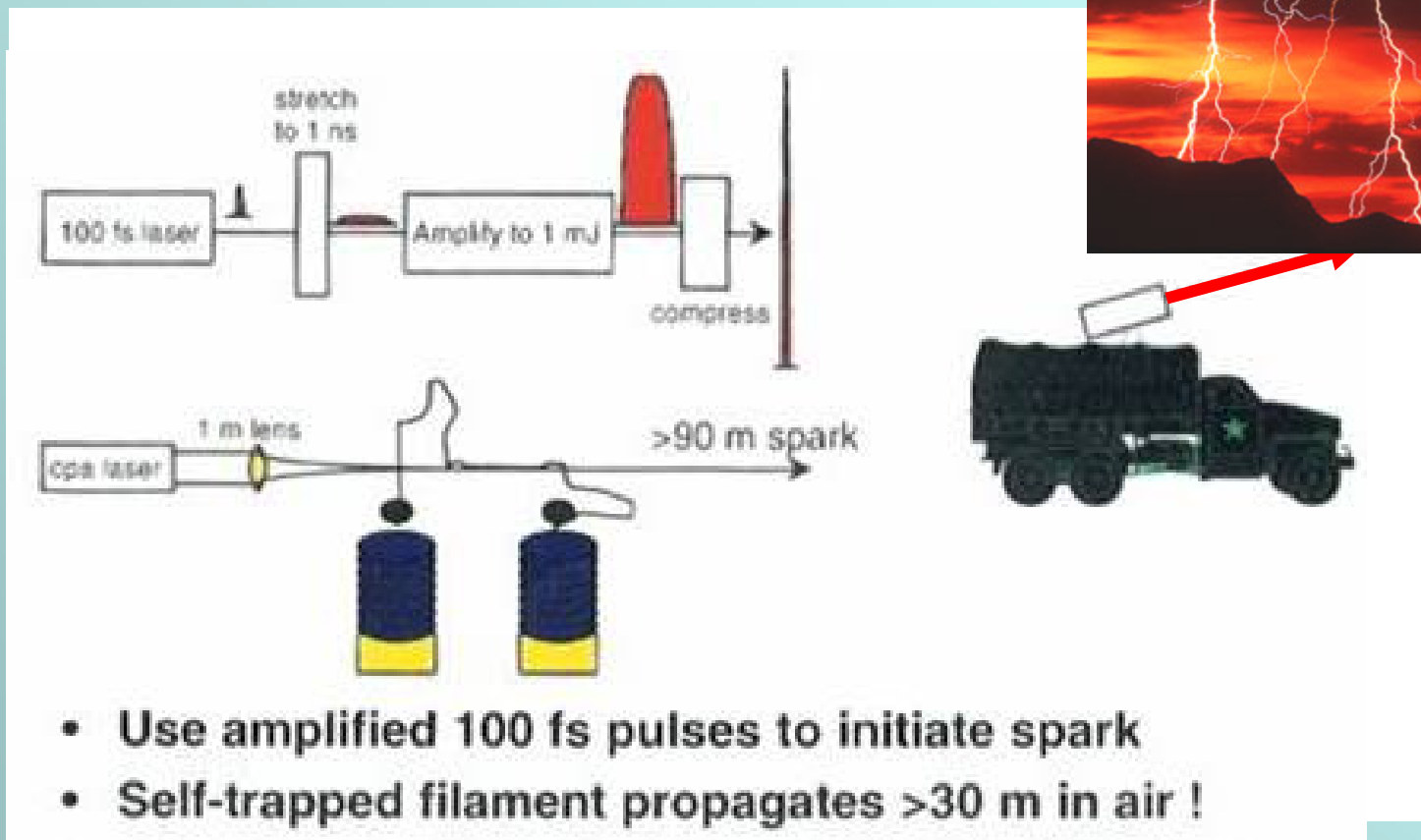
Si sfrutta l'elevatissima potenza di picco degli impulsi ultrabrevi per fabbricare strutture tridimensionali con risoluzione spaziale di 100 nanometri.

Correzione della miopia: taglio della cornea



Gli impulsi ultrabrevi consentono di realizzare un “bisturi luminoso” per il taglio della cornea nella correzione della miopia.

Creazione di canali conduttivi in aria per proteggere dai fulmini



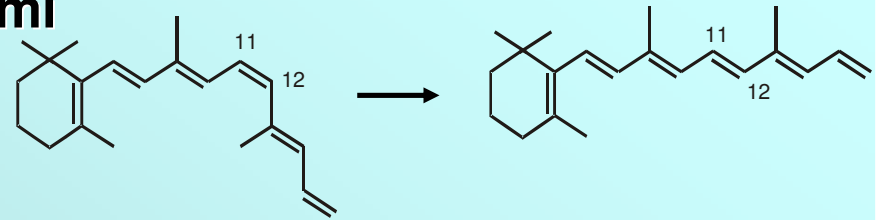
Gli impulsi ultrabrevi ionizzano l'atmosfera creando un canale conduttivo per scaricare la carica elettrica accumulata ed evitare i fulmini.

Le sfide del futuro

Le Sfide del Futuro

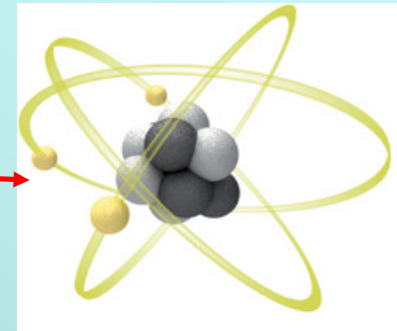
- ❑ Visualizzare lo spostamento degli atomi (come le gambe del cavallo)

- Impulsi a femtosecondi a **Raggi X** (come "Sonda")



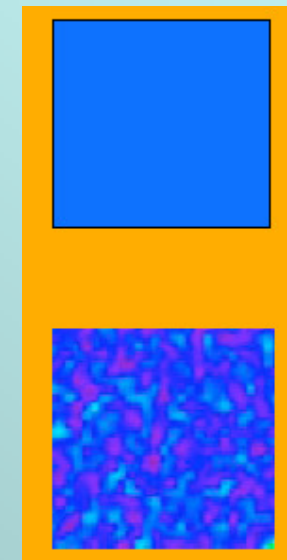
- ❑ Guardare dentro gli atomi: catturare il moto degli elettroni

- Impulsi ad **attosecondi** (1000 volte più brevi)

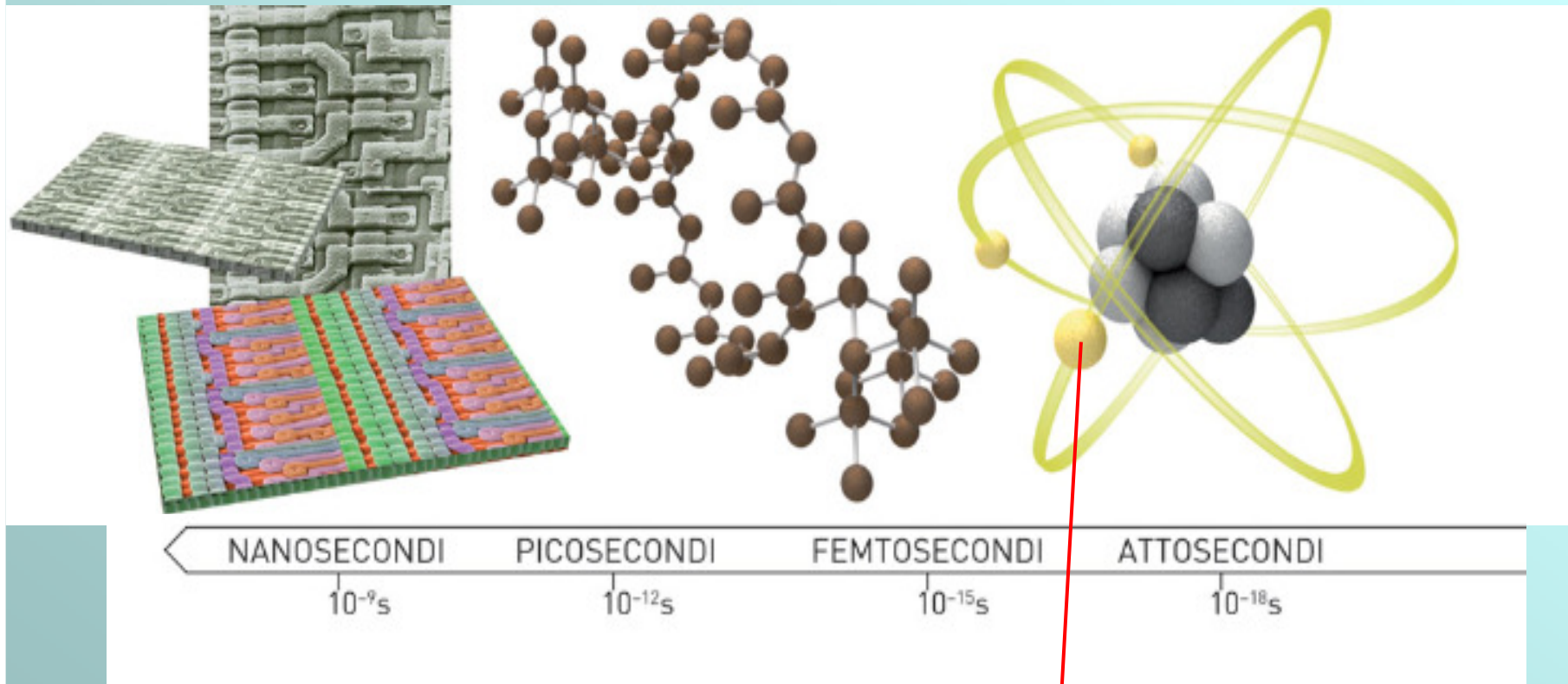


- ❑ Creare materia dalla luce

- C'è attività nel vuoto: particelle e anti-particelle si generano e si annichilano in continuazione
- Impulsi laser molto **brevi e intensi** possono separarle dando loro una vita indipendente

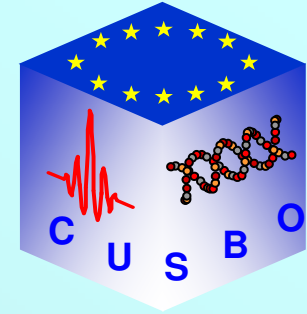


Osservare Eventi nella Materia



Negli atomi gli elettroni si muovono sulla scala dei tempi degli attosecondi

Centre for “Ultrafast Science and Biomedical Optics” (CUSBO)

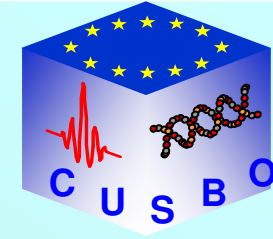


- ❑ **Istituito nel 2001, riunisce i Laboratori Laser del Dip.to di Fisica e dell'IFN-CNR**
 - riconosciuto dall'Unione Europea
 - aperto a gruppi di ricerca internazionali

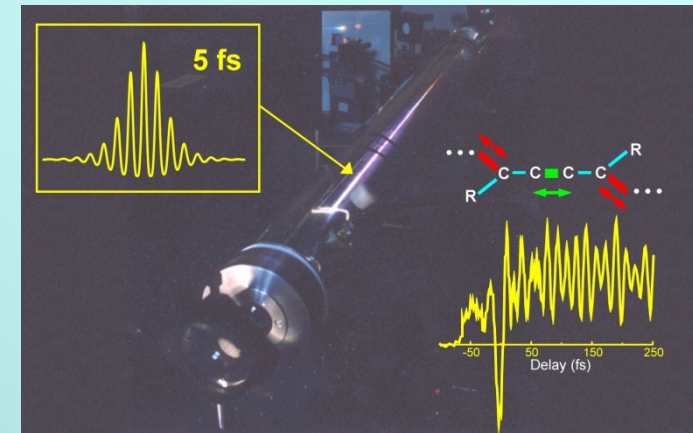
- ❑ **Partner di LASERLAB-Europe**
 - consorzio di Infrastrutture Laser (finanziato dall'Unione Europea)



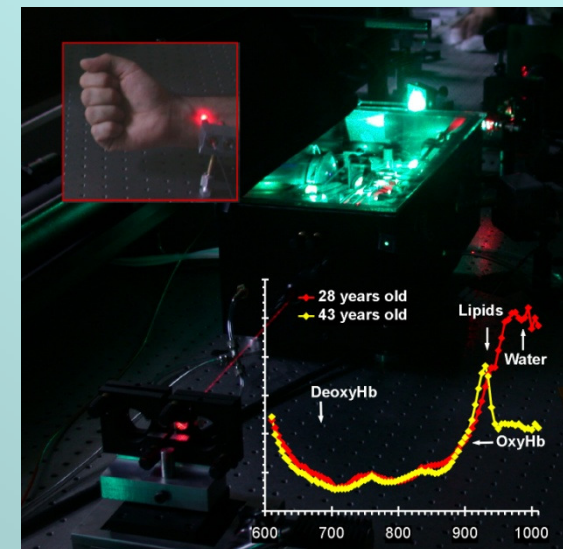
Attività di CUSBO



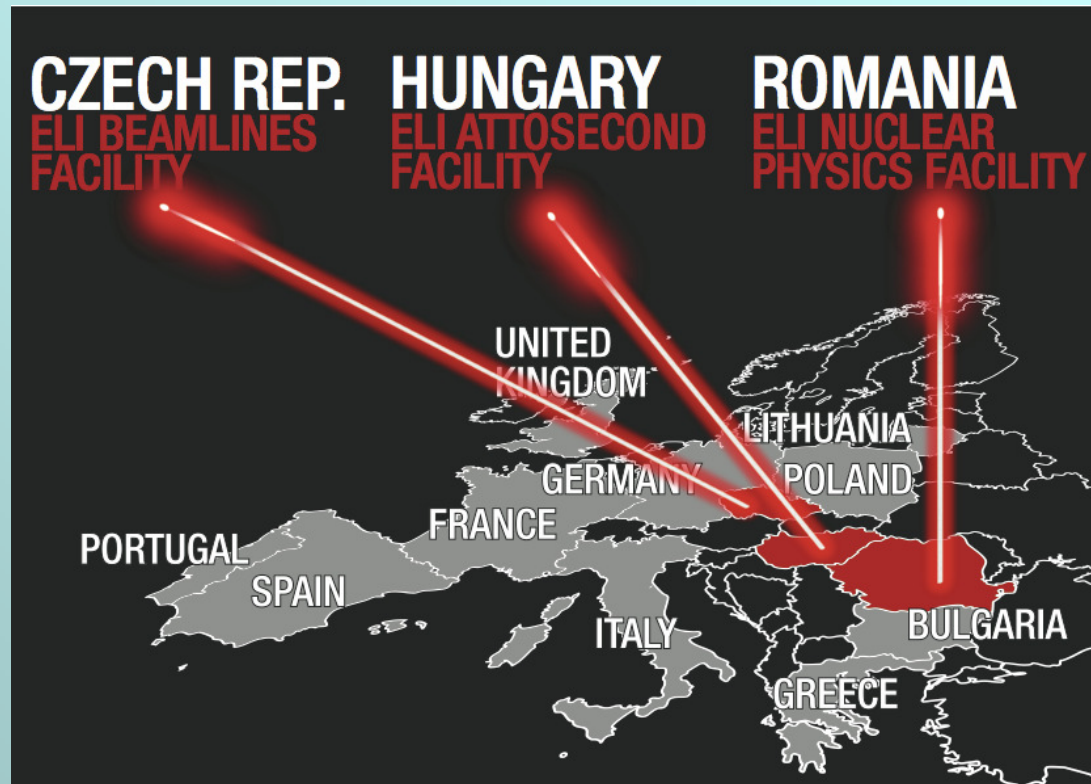
- Generazione di impulsi di luce laser ultrabrevi (femto- e atto-secondi) per lo studio di fenomeni nella materia



- Studio dei tessuti biologici in vitro e in vivo con tecniche di diffusione della luce laser (mammografia ottica, funzionalità del cervello, ecc.)



Extreme Light Infrastructure (ELI)



Un impegno della Comunità Scientifica Internazionale per il 2015 (grazie all'utilizzo dei fondi strutturali dell'Unione Europea):

- **Un investimento di circa 800 milioni di euro**

Il sistema metrico

Gli impulsi generati dai laser sono incredibilmente brevi e le loro potenze di picco incredibilmente alte.

Prefissi:

<u>Piccolo</u>		<u>Grande</u>	
Milli (m)	10^{-3}	Kilo (k)	10^{+3}
Micro (μ)	10^{-6}	Mega (M)	10^{+6}
Nano (n)	10^{-9}	Giga (G)	10^{+9}
Pico (p)	10^{-12}	Tera (T)	10^{+12}
Femto (f)	10^{-15}	Peta (P)	10^{+15}
Atto (a)	10^{-18}	Exa (E)	10^{+18}